



Nach-Gedanken eines extraterrestrischen Physikers*

KARL-HEINZ GLABMEIER

Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, TU Braunschweig

Vor 25 Jahren feierte die Technische Universität Braunschweig ihr 250jähriges Gründungsjubiläum. Im Mittelpunkt der Feierlichkeiten stand der Kongress *Wissenschaft als Zukunftskultur – Vom Nachdenken zum Vordenken*.¹ Auch wenn dieses Motto, damals als Aufforderung verstanden, schleichend seinen Weg aus der Erinnerung der Technischen Universität Braunschweig gefunden hat und anderen Leit(d)bildern Platz machen musste, so ist doch Wissenschaft gerade in Zeiten einer Pandemie mit ihren wissenschaftsbasierten Erklärungen und Prognosen für die Zukunft einer aufgeklärten und optimistischen Kultur unabdingbar.² Mir ist dies Anlass genug, anlässlich meines Ausscheidens aus dem aktiven Dienst an der TU Braunschweig, retrospektiv einige Überlegungen über die Zukunft meines physikalischen Fachgebietes, Geophysik und extraterrestrische Physik, und darüber hinaus anzustellen.³

Von Bernd Rebe (1939-2013), Präsident der TU Braunschweig von 1983 bis 1999, nach meiner Berufung auf den Lehrstuhl für Geophysik und Meteorologie gefragt, was denn meine wissenschaftliche Maxime für die zukünftige Tätigkeit an seiner Universität sei, lautete meine Antwort: „Geophysik in und aus dem Weltraum.“ Diese Maxime hat mein Wirken in Braunschweig entscheidend geprägt wie die nachfolgenden Bemerkungen zeigen werden.

Der Begriff *Geo-Physik*, die Untersuchung physikalischer Prozesse in und auf der Oberfläche unseres Planeten, geht auf Julius Fröbel (1805-1893) zurück.⁴ Zu Fröbels Zeiten war noch nicht an eine direkte physikalische Erkundung anderer Himmelskörper zu denken. Fröbels *Position* des Begriffes *Geophysik* sollte daher nicht gleich eine *Negation*⁵, den Ausschluss anderer Planeten und planetarer Körper als Gegenstand geophysikalischer Studien, bedingen. Geophysikalische Forschung unterscheidet sich in ihren Methoden und in ihrem Anspruch nicht von konventioneller Laborphysik, lediglich der Forschungsgegenstand ist ein anderer, und er erfordert Weiterungen in Bezug auf die Besonderheit der zu betrachtenden räumlichen und zeitlichen Skalen.

In typischen Laborexperimenten hat eine Physikerin die ein physikalisches System bestimmten Parameter unter Kontrolle und kann sie einstellen, variieren, um physikalische Gesetze zu

* Schriftliche Fassung meiner für den 12. Mai 2020 geplanten Abschiedsvorlesung, die leider aufgrund der durch den SARS-CoV-2 Erreger ausgelösten Pandemie und den damit einhergehenden Beschränkungen ausfallen musste.

¹ Glaßmeier, K.H., Tantow, L. (Hrsg.), *Wissenschaft als Zukunftskultur*, Braunschweig, 1995.

² Pinker, S., *Aufklärung jetzt*, Frankfurt, 2018.

³ Siehe auch Glaßmeier, K. H., *Solar system exploration via comparative planetology*, *Nat. Comm.*, 11, 4288, 2020.

⁴ Fröbel, J., *Entwurf eines Systems der geographischen Wissenschaften. I. Mitteilung aus dem Gebiet der Theoretischen Erdkunde 1*, S. 1-35, Zürich, 1834.

⁵ Als übelwollend ist aber die Abqualifizierung der Geophysik als „Das ist keine Physik“ zu betrachten. In diesem Zusammenhang ist eine bis 2003 geltende Regelung in der Prüfungsordnung für das Fach Physik an der TU Braunschweig bemerkenswert. Dort hieß es in § 23 Abs. 2: „Fächer der Angewandten Physik sind Technische Physik und Geophysik. Die Prüfung 'Angewandte Physik' erfolgt in der Regel im Fach Technische Physik. Auf begründeten Antrag kann der Prüfungsausschuss die Prüfung auch im Fach Geophysik genehmigen. Bei dieser Entscheidung soll der Prüfungsausschuss strenge Maßstäbe anlegen.“



erforschen. Ändert man die auf eine Feder wirkende Kraft, so stellt man eine Abhängigkeit der Auslenkung von eben dieser Kraft fest - und findet das *Hookesche Gesetz*.

Anders geht es dem Geophysiker. Die Untersuchung einer einzigen Subduktionszone lässt noch nicht auf eine allgemeine Theorie der Plattentektonik schließen⁶. Die eine solche Zone bestimmenden Parameter lassen sich nicht manipulieren, entziehen sich menschlicher Experimentierfreude. Geophysikalische Forschung muss sich ihre Untersuchungsobjekte in der Natur suchen, kann eben keine Laborexperimente wie die Laborphysik machen. Die Erde als Ganzes ist das natürliche Labor, in dem Geophysikerinnen ihre Experimente 'machen', indem sie unterschiedliche natürliche, gegebene Situationen, z.B. verschiedene Subduktionszonen untersuchen und vergleichen⁷.

Doch stößt diese Vorgehensweise an Grenzen, wenn man globale Prozesse und Phänomene untersucht. Warum gibt es aber überhaupt Plattentektonik? Ist dies ein notwendiger Prozess? Könnte er auch anders aussehen? Oder das Erdmagnetfeld: es wird heute als Folge eines im flüssigen, äußeren Teil des Erdkerns ablaufenden Dynamoprozesses angesehen. Dies ist sicher eine sehr gut begründete Hypothese, doch welche Bedingungen sind es genauer, die diesen Prozess ermöglichen?

Auf globaler Skala gibt es nur zwei Möglichkeiten, physikalische Prozesse genauer zu verstehen: Paläoforschung, d.h. die retrospektive Betrachtung der erdgeschichtlichen Vergangenheit und die Untersuchung anderer Planeten. So erlaubt z. B. die Untersuchung der magnetischen Eigenschaften unterschiedlich alter Gesteine, die Paläomagnetik⁸, Langzeitvariationen des Erdmagnetfeldes festzustellen. Die natürliche Variation der den Dynamoprozess bestimmenden Faktoren ersetzt nun die gezielte Variation experimenteller Bedingungen. Ob aber ein durch einen Dynamo erzeugtes Magnetfeld ein Muss für jeden Planeten ist, dies festzustellen, bedarf einer vergleichenden Beobachtung an anderen Planeten und planetaren Körpern. Planetare Magnetfelder besitzen Merkur, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun.⁹ Venus und Mars reihen sich nicht in diese privilegierte Gruppe planetarer Körper ein. Warum eigentlich nicht?

Lassen wir uns nochmal die Plattentektonik als Beispiel nehmen. Die Beobachtungen und Messungen der Magellan-Mission am Planeten Venus haben überraschenderweise gezeigt, dass eine ähnliche Plattentektonik wie wir sie von der Erde kennen dort nicht auftritt.¹⁰ Das Alter der Oberfläche der Venus ist global mit 500 Millionen Jahren recht jung im Vergleich zum Alter des Planeten von ca. 4.6 Milliarden Jahren. Demgegenüber findet man auf der Erde Oberflächenalter von etwa 200 Millionen Jahren für die ozeanische Lithosphäre bis zu ca. 3.5 Milliarden Jahren für die alten Kratone, wie sie z.B. im Süden des afrikanischen Kontinentes auftreten. Ursache dieses Unterschiedes ist vermutlich eine sehr starke episodische und globale Plattentektonik im Falle der Venus und eine eher regionale, nicht episodische Plattentektonik auf der Erde. Unter episodischer Plattentektonik ist hier ein sehr rasch ablaufender Prozess des Aufsteigens heißer Magma und des Abtauchens kalter Lithosphäre zu verstehen, der zu einem extrem effektiven Wärmetransport aus dem Planeteninneren an die Oberfläche führt und diese in kurzer Zeit völlig neugestaltet. Verbunden ist mit diesem Prozess die Bildung einer neuen,

⁶ Eine sehr kompetente und lesenswerte Einführung in die Geophysik liefert z.B. Clauser, C., Einführung in die Geophysik, Berlin, 2016.

⁷ Glaßmeier, K. H., Labor Erde, Physik in unserer Zeit, 34, 195, 2003.

⁸ Leseempfehlung: Soffel, H. C., Paläomagnetismus und Archäomagnetismus, Berlin, 1991.

⁹ Glaßmeier, K. H., Heyner, D., Planetary Magnetic Fields, in: Maggiolo, R., André, N., Hasegawa, H., Welling, D. (Hrsg.), Solar/Heliosphere 2: Magnetospheres in the solar system, im Druck, New York, 2021.

¹⁰ Saunders, R. S. & G. H. Pettengill, Magellan: Mission Summary, Science 252, 247-249, 1991.



globalen Lithosphäre, die dann auskühlt, bald schwerer und damit wieder gravitativ instabil wird. Diese Instabilität führt dann zu einem erneuten, episodischen tektonischen Geschehen und einem *Resurfacing* der Venusoberfläche etwa alle 500 Millionen Jahre.

Warum zeigt aber die Erde keine solche episodische globale Plattentektonik? Die Gründe sind bei weitem nicht verstanden. Einen Hinweis könnte die bimodale Hypsometrie der Oberfläche der Erde, d. h. die Existenz von ozeanischer und kontinentaler Kruste liefern. Eine solche bimodale Hypsometrie weist die Venus nicht auf. Warum gibt es keine Kontinente auf der Venus? Vermutlich ist das fehlende Wasser die Ursache. Die hohen Oberflächentemperaturen machen Ozeane auf der Venus unmöglich. Wasser ist aber erforderlich, um die großen Mengen kontinentaler Granite zu erzeugen; es wird durch die Subduktion hydratisierten ozeanischen Lithosphärengesteins in den oberen Mantel verbraucht. So entsteht weniger dichte kontinentale Kruste, die im Gegensatz zur dichteren ozeanischen Kruste auch gravitativ stabiler ist und damit das hohe Alter der Kontinente der Erde erklärt. Also: kein Wasser, keine Kontinente; keine Kontinente, keine Plattentektonik.

Und wie steht es mit Leben auf anderen Planeten? Merkur umläuft in 88 Tagen unsere Sonne, dreht sich in 56 Tagen einmal um sich selber. Die langsame Rotation bewirkt tagseitig eine Aufheizung der Oberfläche bis zu Temperaturen über 700° Celsius, zu heiß, um Leben im terrestrischen Sinne zu zulassen. Und die Atmosphäre der Venus ist zu dicht, um mit Drücken bis zu 10 MPa klimatische Bedingungen für Leben zu ermöglichen. Saturns Mond Titan ist von einer dichten Stickstoff Atmosphäre mit Temperaturen um -180°C umgeben, in der es Methanwolken und Methanregen gibt; keine wahrlich freundliche Umgebung. Erst das Studium solch fremder Welten ermöglicht es uns, terrestrische geologische, physikalische und chemische Prozesse aus geeigneter, vergleichender Perspektive zu betrachten.

Dieser kurze Abriss unterschiedlichster Bedingungen und Prozesse, die wir bisher auf und an planetaren Körpern vorgefunden haben, zeigt, wie wesentlich eine vergleichende Planetologie aus physikalischer und geowissenschaftlicher Sicht ist. Im Vordergrund steht dabei nicht die Frage, warum Merkur, Venus oder Titan so sind, wie wir sie vorfinden, sondern warum unsere Erde so ist, wie sie ist und was dies für unser einzigartiges Habitat bedeutet. Eine vergleichende geophysikalische Forschung im Sonnensystem ist daher ein konsequenter Schritt zukünftiger Forschung. Die vergleichende Planetologie ist die geeignete wissenschaftliche Beobachterin der fruchtbaren Bühne des Agon¹¹, Ort der Auseinandersetzung verschiedener physikalischer Möglichkeiten.

Oft bin ich gefragt worden, warum wir denn überhaupt Weltraumforschung betreiben. „Weil wir es können!“ ist dann schnell meine, nicht jede zufrieden stellende Antwort. In den vergangenen 60 Jahren haben wir ein äußerst bemerkenswertes Abenteuer erleben dürfen: die in-situ Exploration unseres Sonnensystems. Weltraummissionen wie Voyager 1/2, Giotto, Cassini-Huygens oder in jüngerer Vergangenheit Rosetta, Hayabusa II und Solar Orbiter haben es uns möglich gemacht, die Sonne, alle acht Planeten sowie Kometen, Asteroiden und sogar Objekte im Kuiper-Gürtel zu besuchen und einige ihrer Eigenarten zu erkunden. Und es gibt nur bedingt Gründe, diese Erfolgsgeschichte anzuhalten.

Haben wir aber für unsere Erde durch das Unternehmen *Erforschung des Weltraums* gelernt? Die Antwort ist ein klares *Ja!* Geophysik im Sinne der Untersuchung globaler physikalischer

¹¹ Roscher, W. H. (Hrsg.), Ausführliches Lexikon der griechischen und römischen Mythologie. Band 1, S. 107, Leipzig, 1886.



Prozesse ist nur in einem eingeschränkten Sinne Wissenschaft, wenn der untersuchte Gegenstand allein die Erde ist. Wissenschaft ist immer auch Vergleich, Betrachtung der Unterschiede zwischen mannigfaltigen Objekten. Nimmt man einen Stein, dann kann man ihn beschreiben, aber erst der Vergleich mit einem weiteren Stein erlaubt wissenschaftlich zu nennende Weiterungen. Die vergleichende Geowissenschaft bzw. vergleichende Planetologie hat wesentlich zur Selbstvergewisserung des Menschen beigetragen. Heute sind wir sicher, in unserem Sonnensystem allein zu sein. Nur die Erde ist offensichtlich das einzige geeignete Habitat für die Entwicklung höherer Lebensformen, wie uns die Erforschung des Sonnensystems in den vergangenen Jahrzehnten deutlich gemacht hat.

Wie geht nun die Reise in den nächsten Jahrzehnten weiter? Zunächst gilt es große Wissenslücken zu schließen. Da sind in vorderster Reihe die beiden großen Eisplaneten Uranus und Neptun zu nennen. Nur die Voyager 2 Sonde ist 1985 bzw. 1989 an diesen beiden Planeten vorbeigeflogen. Sehr wenige Beobachtungen und Messungen konnten während dieser Vorbeiflüge gemacht werden. Doch die Neugierde ist geweckt! Warum besitzen diese beiden Planeten globale Magnetfelder mit magnetischen Topologien so verschieden von der unserer Erde? Hier gilt es, Neuland in unserem Verständnis der Struktur und Dynamik planetarer Magnetfelder zu betreten. Vorschläge für Weltraummissionen zu den Eisplaneten gibt es mittlerweile, doch ihre Realisation ist noch nicht beschlossen¹². Die ersehnten Beobachtungen könnten noch 20-30 Jahre auf sich warten lassen.

20-30 Jahre sind für Weltraumprojekte eine typische Laufzeit. Vom zeitlichen und finanziellen Umfang her sind universitäre Beteiligungen an solchen Projekten den Sonderforschungsbereichen vergleichbar. An der Cluster-Mission bin ich seit 35 Jahren beteiligt, Rosetta beschäftigte mich fast 30 Jahre und unsere Beteiligung an der neuen Mission der europäischen Weltraumagentur ESA in das Jupitersystem zur Erforschung der Eismonde Europa und Ganymed, JUICE, läuft seit über 5 Jahren und wird uns bis ins Jahr 2040 beschäftigen. Diese langen Laufzeiten stellen höchste Planungsanforderungen, administrative und politische, an die beteiligten Wissenschaftlerinnen, Institute, Fakultäten und Universitäten.

Als unabdingbar erscheint mir des Weiteren die *in-situ* Beobachtungen auf den Oberflächen planetarer Körper. Solche Messungen liegen vor für den Mond, Mars¹³, den Kern des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko¹⁴ oder auch Asteroiden wie (433) Eros¹⁵ oder (162173) Ryugu¹⁶. So erfolgreich auch die Erkundung planetarer Oberfläche mit spektralen Untersuchungsmethoden aus dem Orbit heraus sein mag, bleibt doch die *in-situ* Untersuchung der Oberflächen, oberflächennaher und tieferer Schichten im Inneren der Körper die einzige Möglichkeit, wirklich detaillierte wissenschaftliche Untersuchungen durchzuführen. Wer käme schon auf die Idee, eine Geologie des Harzes zu entwickeln ohne jemals einen Aufschluss dort genauer untersucht zu haben? Die Strategie für solche Untersuchungen ist denkbar einfach: man

¹² Fletcher, L. N. u.a., Future exploration of ice giant systems, Phil. Trans. Roy. Astron. Soc. A, 378, Issue 2187, 2020.

¹³ Banerdt, B. W. u.a., Initial results from the InSight mission on Mars, Nat. Geosci., 13, 183-189, 2020.

¹⁴ Auster, H. U., I. Apathy, G. Berghofer ... K. H. Glassmeier, The nonmagnetic nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, Science, 349, DOI: 10.1126/science.aaa5102, 2015.

¹⁵ Scholl, H., L. D. Schmadel, Discovery Circumstances of the First Near-Earth Asteroid (433) Eros. Acta Historica Astronomiae, 15, 210–220, 2002.

¹⁶ Hercik, D., H. U. Auster, D. Constantinescu ... K. H. Glassmeier, Magnetic Properties of Asteroid (162173) Ryugu, J. Geophys. Res., 125, e06035, 2020.



nehme z.B. ein gutes Lehrbuch der Angewandten Geophysik¹⁷ und versuche, die dort beschriebenen Messverfahren auf planetaren Oberflächen durchzuführen. Sicher, einige technische Herausforderungen gibt es zu bewältigen, aber wer hätte Mitte der 80er Jahre gedacht, dass wir wirklich Jahrzehnte später mit Rosetta/Philae auf der Oberfläche eines Kometenkerns landen.

Neben *in-situ* Beobachtung wie sie bereits sehr intensiv, fast schon routinemäßig, auf dem Mars durchgeführt werden, gehören Probenrückführungen in jedes zukünftige Weltraumprogramm. Die Untersuchungen von Mondproben im Labor haben die Bedeutung solcher Probenrückführungen eindrucksvoll gezeigt. Die erfolgreiche Rückkehr der Hayabusa II Proben von der Oberfläche des Asteroiden (162173) Ryugu erregte internationale Aufmerksamkeit. Ebenso wird es der für 2023 erwarteten Rückkehr der OSIRIS-REx Proben von den Oberflächen des (101955) Bennu ergehen. Ihre detaillierte Untersuchung im irdischen Labor wird mit großer Spannung erwartet. Der gemeinsame Aufbau und Betrieb entsprechender Laboratorien zur Analyse der Eigenschaften des rückgeführten Materials ist bereits in vollem Gange.¹⁸

Der Weltraum hat sich mittlerweile aber auch zu einer weiteren Bühne des Agons gemauert, gibt dem Wettstreit zwischen den Milliarden Jeff Bezos und Elon Musk um die Eroberung des Mondes und des Planeten Mars ein Podium. Bezos tönte¹⁹ „Wir müssen ins All, um die Erde zu retten“ und Musk möchte bereits 2025 auf dem Mars sein neues Haus beziehen²⁰. Sein Lieblingsgefährt, ein kirschroter Tesla, befindet sich bereits in einer Umlaufbahn um unseren Nachbarplaneten²¹. Heldeneuphorie oder genialer Werbegag? In jedem Falle ist dies aber Zeugnis des Wunsches nach Entengung unseres Daseins auf dem Heimatplaneten. Wer erinnert sich da nicht an den Liedtext von Peter Schillings *Major Tom* mit dem Refrain „Völlig losgelöst von der Erde schwebt das Raumschiff, völlig schwerelos“²². Doch sollte man dieser Fiction-in-Science nicht erliegen. Vielleicht schaffen wir es noch bis zum Mars. Aber dann erreicht der Aufbruch aus der Enge²³ der Erde wohl seine Krise, Objekte mit bemannter Raumfahrt jenseits der Marsbahn zu erreichen ist mehr als unrealistisch, es sei denn hyperdisruptive Technologien tauchen auf.

Aber müssen wir denn überhaupt *persönlich* zu den entferntesten Objekten im Sonnensystem und darüber hinaus? Man stelle sich vor, nach langem Kälteschlaf an der Oberfläche von Neptun aufzuwachen. Kameras einschalten, Sensoren aktivieren, Raumanzug anlegen, Luke öffnen, eine uns allen aus Science-Fiction-Filmen bekannte Vorgehensweise. Die Sensoren sind erforderlich, um die Temperatur zu erkunden, atmosphärische Gase zu erkennen. Sie vermitteln einen ersten Eindruck. Den Raumanzug braucht man, da der Umgebungsdruck möglicherweise deutlich geringer als der Druck der terrestrischen Atmosphäre ist, an den wir evolutionär ange-

¹⁷ Ich empfehle Telford, W. M. u.a., Applied Geophysics, Cambridge, 1990.

¹⁸ Z.B. Helbert, J., Maturilli, A. & De Vera, J. P. Planetary Sample Analysis Laboratory (SAL) at DLR, Lunar Planet. Sci. Conf., 1834, 2019.

¹⁹ Armbruster, A., Beam me up, Jeff, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung 11. Juni 2019, <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/diginomics/amazon-chef-jeff-bezos-ueber-die-zukunft-der-menschheit-16230171.html>, abgerufen am 13. Oktober 2020.

²⁰ Spiegel online, Elon Musk will auf den Mars umziehen. 26. November 2018. <https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/elon-musk-will-auf-den-mars-umziehen-a-1240407.html>, abgerufen am 13. Oktober 2020.

²¹ ntv 2018, Tesla kreist durchs Sonnensystem. Elon Musks "Starman" erreicht Mars. 6. November 2018, <https://www.n-tv.de/wissen/Elon-Musks-Starman-erreicht-Mars-article20707083.html>, abgerufen am 13. Oktober 2020.

²² Schilling, P., Major Tom, Liedtext, 1982. <https://www.songtexte.com/songtext/peter-schilling/major-tom-vollig-losgeost-43dcfbef.html>, abgerufen 15. Oktober 2020.

²³ Glaßmeier, K. H., Aufbruch aus der Enge, Schelling Studien, 8, 161-185, 2020.



passt wurden. Ohne druckausgleichenden Raumanzug würden unsere Zellen platzen. Möglicherweise ist die Atmosphäre sehr dicht, dann sähen wir mit unseren Augen wie in einem Nebel nichts und müssten mit Ultraschallsensoren, Fledermäusen gleich, unsere Umgebung betrachten. Oberflächenstrukturen könnten wir anfassen, berühren, ertasten. Aber der haptische Eindruck wäre vermittelt durch eine große Zahl von Sensoren in dem Handschuh unseres Raumanzuges²⁴. Alle *Wahrnehmungen* und *Erlebnisse* auf der Oberfläche von Neptun wären nicht echt, wären verfremdet, interpretiert durch technische Einrichtungen. Die so vermittelte Wirklichkeit ist eine durch Technik vermittelte Wirklichkeit. Lohnt dies den Aufwand?

Sollten wir dann nicht gleich autonome Roboter zum Neptun schicken, ausgestattet mit umfangreichster Sensorik, und uns all die Messdaten zur Erde zurücksenden lassen und diese dann in einer *virtual reality* Umgebung²⁵ für uns zur Erfahrung bringen? Diese Messdaten könnte man dann noch durch umfangreiche numerische Simulationen und deren experimentelle Ergebnisse ergänzen, das Ganze dann zu einer *numerically enriched augmented virtuality* werden lassen. Im Bereich der Luftfahrtforschung ist die Bedeutung der *virtual reality* bereits erkannt. Wissenschaftler und Ingenieurinnen am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig erarbeiten zum Beispiel Verfahren für das *virtual and remote control* von Flugverkehrskontrolltürmen²⁶. Hier sehe ich für die Weltraumforschung ein großes Potential für zukünftige Forschung und Entwicklung und Zusammenarbeit.

„Aber ich möchte den Stein doch lieber selber anfassen, möchte selbst erfahren, was da auf der Oberfläche von 67P/Churyumov-Gerasimenko passiert, d.h. ich möchte persönlich dabei sein, wenn es etwas zu entdecken gibt. Nur dann ist es für mich wirklich.“ So habe ich manche Kollegin, manchen Mitarbeiter argumentieren gehört. Aber was heißt es eigentlich, wenn wir von unserem *Ich*, unserem *Selbst* sprechen? Sind dies nicht Konstrukte oder Modelle der Realität, die in unserem Gehirn, von externen Reizen gespeist, geformt werden? Hier ergeben sich äußerst interessante wissenschaftliche Berührungspunkte zwischen Neurowissenschaften, Künstlicher Intelligenz, Weltraumforschung und Philosophie.²⁷

Autonomie der Roboter reicht vermutlich nicht, gefordert sind eher *self-aware spacecraft*. Darunter sind hier Systeme zu verstehen, die sich ihres internen Zustands im technischen Sinne *bewusst* sind, ein technisches *Situationsbewusstsein* für ihre Umgebung haben, ihre aktuellen Fähigkeiten bewerten und in die Zukunft projizieren können, die Missionsziele gewissermaßen *verstehen* und Entscheidungen unter Unsicherheit treffen, um seine, von ihrer Konstrukteurin definierten Missionsziele zu erreichen. An solchen Systemen wird an der TU Braunschweig intensiv im Zusammenhang mit sich selbst steuernden Automobilen schon geforscht²⁸. Ansätze einer *self-aware spacecraft* Strategie wurden auch im Antrag der Technischen Universität im Rahmen der Bewerbung um Titel und Mittel einer Exzellenzuniversität formuliert.

²⁴ Z. B. Sundaram, S. u. a., Learning the signatures of the human grasp using a scalable tactile glove, *Nature* 569, 698–702, 2019.

²⁵ Z.B. Baileson, J., *Experience on Demand: What Virtual Reality Is, How It Works, and What It Can Do*, New York/London, 2018.

²⁶ Fürstenau, N. (Hrsg.), *Virtual and Remote Control Tower*, Cham, 2016.

²⁷ Zum Einstieg siehe Metzinger, T., *The Ego Tunnel – The Science of the Mind and the Myth of the Self*, New York, 2009.

²⁸ Schlatow, J., Möstl, M., Ernst, R. u.a., Self-awareness in autonomous automotive systems, in: *Design, Automation and Test in Europe (DATE)*, Lausanne, 2017.



Teil des Antrages war der Vorschlag für *MoveSpace*. Ziele dieses transdisziplinären Projektes „sind die nachhaltige Herstellung und der Betrieb von großen Sensornetzwerken im Welt-raum.“²⁹ Umfangreiche Erfahrungen im Betrieb von kleineren Netzwerken von künstlichen Satelliten und der wissenschaftlichen Auswertung dadurch gewonnener Messdaten konnten wir an der TU im Rahmen der Projekte Cluster (Projekt der ESA mit Formationsflug von vier Raumfahrzeugen) und THEMIS (Projekt der University of California at Berkeley und NASA mit Formationsflug von fünf Raumfahrzeugen) sammeln.³⁰ Größere Netzwerke, Schwärme von Kleinsatelliten, erfordern die Entwicklung neuer Methoden zur Optimierung solcher Sensorcluster.

Aber auch der Frage der Nachhaltigkeit zukünftiger Raumfahrtprojekte muss mehr Raum gegeben werden. Gegenwärtig fordern internationale Vereinbarung, dass Raumfahrzeuge im Erdborbit spätestens nach 25 Jahren einem sogenannten *de-orbiting* zuzuführen sind, d.h. sie müssen zurück in die Atmosphäre verbracht werden, wo sie dann verglühen.³¹ So sinnvoll diese Vorgabe auch ist um die Zunahme von Weltraummüll im Orbit zu vermeiden, so fragwürdig ist es, die Atmosphäre zur Müllhalde für Satellitenabfall verkommen zu lassen. Detaillierte Modellbetrachtungen zeigen, dass der anthropogene Eintrag von Stoffen in die obere Atmosphäre zukünftig dem des natürlichen Eintrages durch Meteoriden vergleichbar ist, mit noch nicht bekannten Auswirkungen auf unsere Atmosphäre.³² Es gibt hier noch viel zu tun, auch im Sinne einer transdisziplinären Weltraumforschung.

Einige Anmerkungen zum Abschluss: die Technische Universität Braunschweig hat in den vergangenen drei Jahrzehnten eine große Zahl von Veränderungen durchmachen können/dürfen/müssen. Diese Veränderungen waren teils das Ergebnis TU-interner Diskussionen und Entscheidungen, meist aber bedingt durch die Veränderungen äußerer Rahmenbedingungen.

Glaubte Bernd Rebe noch daran, dass viele Veränderungsphantasien „am Bollwerk des deutschen Universitätssystems zerschellen werden“³³, so lehrt uns die Wirklichkeit Anderes. Insbesondere der Bologna-Prozess mit der Einführung von Bachelor- und Master-Studiengängen hat in beispielloser Weise Kräfte gebunden, die besser anderweitig hätten genutzt werden können. Viele der neuen Studiengänge, anfänglich der Universität aufoktroiert, ähneln heute wieder den früheren Diplomstudiengängen, auch wenn viele Inhalte nun unter neuem Namen firmieren. Die Arroganz bildungspolitischer Macht, gepaart mit beeindruckender Selbstgerechtigkeit, hat aus dem deutschen Universitätssystem zeitweilig ein großes Experimentierlabor gemacht, in dem alle werkeln durften, nur wir an der Basis nicht.

Die zunehmende Ökonomisierung der Universität ist in meinen Augen beunruhigend. Intensiver hat sich z.B. Jochen Krautz mit Fragen der Durchsetzung eines ökonomistischen Menschenbildes beschäftigt. Die Novellierung des Niedersächsischen Hochschulgesetzes im Jahre 2002 unter dem Wissenschaftsminister Thomas Oppermann (1954-2020) machte aus dem Präsidium

²⁹ Ebd. S. 50.

³⁰ Glaßmeier, K. H. u.a., CLUSTER as a wave telescope: First results from the fluxgate magnetometer, *Ann. Geophys.*, 19, 1439-1448, 2001; Glaßmeier, K. H. u.a., Magnetospheric quasi-static response to the dynamic magnetosheath: A THEMIS case study, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L17S01, doi:10.1029/2008GL033469, 2008; Narita, Y., Plasma Turbulence in the Solar System, Springer, 2012.

³¹ ESA, Requirements on Space Debris Mitigation for ESA Projects, Technical Report, Paris, 2008.

³² Schulz, L., K. H. Glassmeier, On the Anthropogenic and Natural Injection of Matter into Earth's Atmosphere, *Adv. Space Res.*, 67, 1002-1025, 2021.

³³ Persönliche Mitteilung anlässlich einer Sitzung des TU-Konzils am 8. Dezember 1995.



einen Vorstand, der von einem Aufsichtsrat, dem nicht gewählt, sondern vom Ministerium für Wissenschaft und Kultur ernannten Hochschulrat kontrolliert werden soll. Dies ist für private Wirtschaftsunternehmen mit hierarchischen Strukturen eine sehr gut funktionierende Organisation. Die an einer Universität als Beamtinnen und Beamte tätigen Professorinnen und Professoren genießen aber den Schutz des Grundgesetzes: in § 5(3) heißt es *Kunst und Wissenschaft, Forschung und Lehre sind frei. Die Freiheit der Lehre entbindet nicht von der Treue zur Verfassung*. Diese Freiheit von Forschung und Lehre hebt die hierarchische Ordnung teilweise auf und bringt andere Formen der Teilhabe mit sich. Die Leine, an der wir laufen, haben die Gründungsmütter und -väter unserer Verfassung aus gutem Grund lang gewählt. Universitäten können nicht wie Wirtschaftsunternehmen organisiert werden!

Die Lehrstühle an der TU Braunschweig sind nur dürtig mit finanziellen Mittel grundausgestattet, zumindest kann ich dies für meinen Lehrstuhl in den vergangenen 30 Jahren gut beurteilen. Drittmittel sind heute *das* alles beherrschende Thema. Wo bekomme ich neues Geld her, wo lasse ich mich für die Präsentation meines neuen Forschungsprojektes beraten, welche geheimen Verführungen baue in meinen Antrag ein, um ihn exzellent aussehen zu lassen, wie schaffe ich es, in *Nature* oder *Science* zu publizieren? Diese Probleme greifen zunehmend Raum. *Antrags-Exzellenz* ist gefragt, *Antrags-Inhalte* treten demgegenüber zurück, Forschungsfortschritte und -ergebnisse drohen zweitrangig zu werden. Auch so kann politische Kontrolle ausgeübt, die Leine wieder kurz gezogen werden. Und die potemkinschen Dörfer bringen sich da in Erinnerung!

Natürlich muss sich eine Universität wie die unsere gesellschaftlichen Entwicklungen stellen. *Change-Management* an einer Universität stellt eine sehr große Herausforderung an die Leitung dar und kann nicht einfach darin bestehen, eine Top-Down Entscheidung als Bottom-Up Prozess zu erklären. Als eine solche Erklärung habe ich den Leit(d)bildprozess mit der Definition der Forschungsschwerpunkte unserer TU empfunden. Ein Bild ist fertig, ein Bild hängt an der Wand, ist zum Betrachten dort. Schöner wäre das Spinnen eines *Leitfadens* gewesen, denn „die Stärke eines Fadens liegt nicht darin, dass irgendeine Faser durch seine ganze Länge läuft, sondern darin, dass viele Fasern einander übergreifen.“³⁴ Einer dynamischen Universität wäre ein solcher *Leitfaden* angemessener gewesen.

Trotz intensiver Bemühungen ist es mir übrigens bisher nicht gelungen, eine Dokumentation des Prozesses der Leit-Bild-Entstehung zu erhalten oder in der Universitätsbibliothek zu finden. Kritische Bemerkungen meinerseits wurden lapidar mit der Bemerkung „Irgendetwas stimmt mit ihrem *Change-Management* nicht!“ abgetan. *Change-Management* keine Aufgabe für die Leitung, eher Werkzeug für die persönliche Anpassung? Agone sind eher störend, Bewegung auf der Agone, der Linie, entlang der es keine Abweichung gibt, natürlich einfacher. Eine Veränderung hat mich in dieser Hinsicht besonders betrübt, die Abschaffung des Konzils. Das Konzil war ein aus der Urwahl der verschiedenen Statusgruppen hervorgehendes Kollegialorgan der Universität, gewissermaßen das Universitätsparlament, dem der Präsident oder die Präsidentin zweimal jährlich einen Rechenschaftsbericht vorlegen musste³⁵. Die Konzilsversammlung war ein Ort, an dem gestritten werden konnte. Gerne zitiere ich hier Georg Simmel (1858-1918) und seine Analysen zur Rolle des Streits: „Wenn jede Wechselwirkung unter Menschen eine Vergesellschaftung ist, so muss der Kampf, der doch eine der lebhaftesten Wechselwirkungen ist, der in der Beschränkung auf ein einzelnes Element logisch unmöglich ist, durchaus

³⁴ Wittgenstein, L., *Philosophische Untersuchungen*, §67, S. 58, Frankfurt, 2003.

³⁵ Von 1999 bis 2001 war ich Mitglied im und Sprecher des Vorstands des Konzils der TU Braunschweig.



als Vergesellschaftung gelten....Der Kampf selbst ist schon die Auslösung der Spannung zwischen den Gegensätzen; dass er auf den Frieden ausgeht, ist nur ein einzelner, besonders nahe-
liegender Ausdruck dafür, dass er eine Synthese von Elementen ist, ein Gegeneinander, das mit
dem Füreinander unter einen höheren Begriff gehört.³⁶ Kampf und Vergesellschaftung, Streit
und sich daraus ergebende Einigkeit, neue Ansätze dazu hat es an der TU Braunschweig im
Rahmen des Prozesses zur Erstellung des Antrages im Rahmen der Bewerbung um Titel und
Mittel einer Exzellenzuniversität gegeben. Meiner Universität wünsche ich alles Gute auf die-
sem Wege zurück nach vorne: *Move Carolowilhelmina.*

Danksagung

Mein ganz herzlicher Dank gilt insbesondere all meinen Studenten und Studentinnen, Dokto-
randinnen und Doktoranden, Kollegen und Kolleginnen an meinen Stationen in Münster, Köln,
Washington, Longyearbyen, Lindau/Göttingen und Braunschweig. Insbesondere erinnere ich
als Weggefährten an: Hans-Ulrich Auster, Vassilis Angelopoulos, Andre Balogh, Wolfgang
Baumjohann, Chris Carr, Lasse Clausen, Malcolm Dunlop, Mark Engebretson, Karl-Heinz For-
nacion, Norbert Fürstenau, Shigeru Fujita, Mel Goldstein, Daniel Heyner, Hans Junginger,
Dmitri Klimushkin, Axel Korth, Petra Mischnick, Uwe Motschmann, Yasuhito Narita, Fritz
Neubauer, Ingo Richter, Otto Richter, Antje Schwalb, Gerhard Schwehm, Heinrich Soffel,
Sami Solanki, Bernd Stoll, Bruce Tsurutani, Jürgen Untiedt, Rolf vom Stein, Joachim Vogt,
Volker Wagenitz, Harald Wagner, Jochen Wirths. Schwer in Worte zu fassen ist die Bedeutung,
die meine Frau Gisela Sieverdingbeck für mich in all den vergangenen vier Jahrzehnten für
mich hatte und hat.

Literaturhinweise

- Armbruster, A., Beam me up, Jeff, Frankfurter Allgemeine Zeitung 11. Juni 2019,
<https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/diginomics/amazon-chef-jeff-bezos-ueber-die-zukunft-der-menschheit-16230171.html>, abgerufen am 13. Oktober 2020.
- Auster, H. U...K. H. Glassmeier, The nonmagnetic nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, *Science*, 349, doi: 10.1126/science.aaa5102, 2015.
- Banerdt, B. W. u.a., Initial results from the InSight mission on Mars, *Nat. Geosci.*, 13, 183-189, 2020.
- Clauser, C., Einführung in die Geophysik, Berlin, 2016.
- European Space Agency (ESA), Requirements on Space Debris Mitigation for ESA Projects, Technical Report, Paris, 2008.
- Fletcher, L. N. u.a., Future exploration of ice giant systems, *Phil. Trans. Roy. Astron. Soc. A*, 378, Issue 2187, 2020.
- Fröbel, J., Entwurf eines Systems der geographischen Wissenschaften, I. Mitteilung aus dem Gebiet der Theoretischen Erdkunde 1, S. 1-35, Zürich, 1834.
- Fürstenau, N. (Hrsg.), Virtual and Remote Control Tower, Cham, 2016.
- Glaßmeier, K. H., L. Tantom, L. (Hrsg.), Wissenschaft als Zukunftskultur, Braunschweig, 1995.
- Glaßmeier, K. H. u.a., CLUSTER as a wave telescope: First results from the fluxgate magnetometer, *Ann. Geophys.*, 19, 1439-1448, 2001.
- Glaßmeier, K. H., Labor Erde, *Physik in unserer Zeit*, 34, 195, 2003.
- Glaßmeier, K. H. u.a., The ROSETTA Mission: Flying Towards the Origin of the Solar System, *Space Sci. Rev.* 128, 1-21, 2007.
- Glaßmeier, K. H. u.a., Magnetospheric quasi-static response to the dynamic magnetosheath: A THEMIS case study, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L17S01, doi:10.1029/2008GL033469, 2008.

³⁶ Simmel, G., *Soziologie*, S. 247, Leipzig, 1908.



- Glaßmeier, K. H., Solar system exploration via comparative planetology, *Nat. Comm.*, 11, 4288, 2020.
- Glaßmeier, K. H. & D. Heyner, Planetary Magnetic Fields, in: Maggiolo, R., André, N., Hasegawa, H., Welling, D. T. (Hrsg.), *Space Physics and Aeronomy Collection, Volume 2: Magnetospheres in the solar system*, Geophysical Monograph 259, Seite 355-377, American Geophysical Union. Published, Washington, 2021.
- Glaßmeier, K. H., Aufbruch aus der Enge, *Schelling Studien*, 8, 161-185, 2020.
- Helbert, J., Maturilli, A. & De Vera, J. P. Planetary Sample Analysis Laboratory (SAL) at DLR, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, 1834, 2019.
- Hercik, D...K. H. Glassmeier, Magnetic Properties of Asteroid (162173) Ryugu, *J. Geophys. Res.*, 125, e06035, 2020.
- Kaysser-Pyzalla, A. (Hrsg.), *We move...*, Antrag im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder, Förderlinie Exzellenzuniversität, Braunschweig, 2018.
- Krautz, J., Bildungsreform und Propaganda - Strategien der Durchsetzung eines ökonomistischen Menschenbildes in Bildung und Bildungswesen, in: *Deutscher Lehrerverband (Hrsg.), Wozu Bildungsökonomie?* S. 51-82, Berlin, 2012.
- Metzinger, T., *The Ego Tunnel – The Science of the Mind and the Myth of the Self*, New York, 2009.
- Müller, D. u.a., Europe's next mission to the Sun, *Nat. Astron.* 4, 205, 2020.
- Narita, Y., *Plasma Turbulence in the Solar System*, Berlin, 2012.
- ntv 2018, Tesla kreist durchs Sonnensystem. Elon Musks "Starman" erreicht Mars. 6. November 2018, <https://www.n-tv.de/wissen/Elon-Musks-Starman-erreicht-Mars-article20707083.html>, abgerufen am 13. Oktober 2020.
- Pinker, S., *Aufklärung jetzt*, Frankfurt, 2018.
- Reinhard, R., The Giotto encounter with comet Halley, *Nature* 321, 313–318, 1986.
- Roscher, W. H. (Hrsg.), *Ausführliches Lexikon der griechischen und römischen Mythologie*. Band 1, S. 107, Leipzig 1886.
- Saunders, R. S., Pettengill, G. H., Magellan: Mission Summary, *Science* 252, 247-249, 1991. <https://doi.org/10.1126/science.252.5003.247>
- Schladow, J. u.a., Self-awareness in autonomous automotive systems, in: *Design, Automation and Test in Europe (DATE)*, Lausanne, 2017.
- Schilling, P., Major Tom, Liedtext, 1982. <https://www.songtexte.com/songtext/peter-schilling/major-tom-vollig-losgelost-43dcfbef.html>, abgerufen 15. Oktober 2020.
- Scholl, H. & L. D. Schmadel, Discovery Circumstances of the First Near-Earth Asteroid (433) Eros, *Acta Historica Astronomiae*, 15, 210–220, 2002.
- Schulz, L., K. H. Glassmeier, On the Anthropogenic and Natural Injection of Matter into Earth's Atmosphere, *Adv. Space Res.*, 67, 1002-1025, 2021.
- Simmel, G., *Soziologie*, S. 247, Leipzig, 1908.
- Soffel, H. C., *Paläomagnetismus und Archäomagnetismus*, Berlin, 1991.
- Spiegel online, Elon Musk will auf den Mars umziehen, 26. November 2018. <https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/elon-musk-will-auf-den-mars-umziehen-a-1240407.html>, abgerufen am 13. Oktober 2020.
- Spilker, L., Cassini-Huygens' exploration of the Saturn system: 13 years of discovery, *Science* 14, 1046–1051, 2019.
- Stern, A., The new horizons Pluto Kuiper belt mission: an overview with historical context. *Space Sci. Rev.* 140, 3–21, 2008.
- Stone, E., The Voyagers. *Nature Astronomy* 1, 896, 2017.
- Sundaram, S. u. a., Learning the signatures of the human grasp using a scalable tactile glove, *Nature* 569, 698–702, 2019.
- Telford, W. M., L. P. Geldart, R. E. Sheriff, *Applied Geophysics*, Cambridge, 1990.



- Tsuda, Y. u.a., System design of the Hayabusa 2-asteroid sample return mission to 1999 JU3, *Acta Astron.* 91, 356–362, 2013.
- Wittgenstein, L., *Philosophische Untersuchungen*, §67, S. 58, Frankfurt, 2003.